

## コンダクション形電磁ポンプの動作に関する研究

著者	菊地 新喜
号	285
発行年	1975
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/11234">http://hdl.handle.net/10097/11234</a>

氏 名	きく 菊 ち 地 しん 新 き 喜
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 5 1 年 3 月 5 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 3 7 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	コンダクション形電磁ポンプの動作に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 村上 孝一 東北大学教授 八田 吉典 東北大学教授 穴山 武 東北大学教授 淵澤 定敏 東北大学教授 神山 新一

## 論 文 内 容 要 旨

導電性流体を電磁力により直接駆動する，電磁ポンプは可動部分がないため，全循環系の気密が容易であること，流量制御が連続的，且つ簡単に行なえることなどの優れた特性を有し，このため原子力工業，冶金工業などの分野において注目され，既に一部は実用に供されつつある。しかし，電磁ポンプは一般の電気機器と異なり，磁束及び電流が複雑な立体分布をなし，更に導電柱流体のオーム損失及び流体損失も立体的に分布していることなどのため，動作が複雑になり，従来迄の解析結果を用いて，電磁ポンプ動作を厳密に説明し，或いは最適な電磁ポンプ設計を行なうことは困難と思われる。

本研究は電磁ポンプの中で，構造が最も簡単で比較的効率の良いコンダクション形電磁ポンプについて，その動作機構を解明し且つ具体的に電磁ポンプを設計，製作する場合に役立つ事項を

得るために行ったものである。

以下に各章の概要を示す。

## 第 1 章 緒 言

第 1 章は緒言で、電磁ポンプ研究の歴史的背景を述べ、電磁ポンプと機械的ポンプの性能を比較することにより、電磁ポンプの特徴を明確にし、次いでコンダクション形電磁ポンプとインダクション形電磁ポンプとの比較において、コンダクション形電磁ポンプの利点を列挙し、電磁ポンプ研究の問題点と本研究の意図するところを述べたものである。

## 第 2 章 コンダクション形電磁ポンプの基礎理論

第 2 章では、コンダクション形電磁ポンプの基本的な動作機構を説明し、電磁ポンプが実際に動作している場合の電磁ポンプを構成する電気回路、磁気回路及び流体回路の相互作用がポンプ特性に及ぼす影響を考察している。

更に、電機子反作用の発生機構について考察すると共に、そのポンプ性能に与える影響について説明し、電機子反作用を除去する方法及び問題点について述べている。

又、導電性粘性流体の流速分布に与える印加磁界の影響について論及し、磁界を印加することにより、駆動部管路内の流速分布が均一分布に近づき、流体の見掛けの粘性係数が増加すること及びそのために、流速の大きい範囲まで層流領域が拡がることなどを示している。

## 第 3 章 直流コンダクション形電磁ポンプの動作解析

本章では、直流コンダクション形電磁ポンプの動作解析を行なった結果について述べている。

電極の形状及び配置を適当にすることにより、ポンプ入口及び出口の電極間電圧に、入口側で大になるような差を与えると、電機子反作用を軽減し、ポンプ出力が増し、効率が增大する。このような電極間電圧分布を考慮して、駆動部内の磁束分布、電流分布を示す式を導き、更に、ポンプ発生圧力、効率など電磁ポンプ動作を示す基本式を求めた。ポンプ発生圧力は(3.1)式のように示される。

$$P_z = \bar{B}_d \bar{J}_d c \left[ 1 - \frac{H_{id}}{\bar{H}_d} \left\{ 1 - \frac{(V_o - V_c)}{2bv\mu H_{id}} \right\} \frac{\alpha \coth \alpha - 1}{\alpha} \right] \quad (3.1)$$

但し、 $\bar{B}_d$  は平均磁束密度、 $\bar{J}_d$  は平均電流密度、 $b$  は駆動部の幅、 $c$  は駆動部の長さ、 $H_{id}$  は電極電流による磁界の最大値、 $(V_o - V_c)$  はポンプ入口出口間の電極間電圧差、 $v$  は平均流速、 $\alpha = \mu v b c / 2(\rho b + 2rc)$  は磁気レイノルズ数に相当するもの、 $\rho$  は流体の抵抗率、 $\mu$  は透磁率、 $rc$  は流体と電極間の単位面積当りの接触抵抗である。(3.1)式は、電機子反作用による発生

圧力の減少を妨ぐためには、磁束密度 $\overline{B_d}$ を大きくし、電流密度 $\overline{J_d}$ を小さくして、 $(H_{id}/\overline{H_d})$ の値を小さくすることが必要であること、及び適当な $(V_o-V_c)$ を与えることにより電機子反作用の影響を除去できることを示している。

又、駆動部内の磁束分布、電流分布に与える電極間電圧分布の効果を検討し、電機子反作用により生じた速度起電力分布の変化を電極間電圧分布を与えることにより補償し、電流分布を改善して、電機子反作用の軽減に役立つことを指摘している。

次いで、電磁ポンプ効率について検討し、電磁ポンプ動作を電動機として動作する部分とポンプとして動作する部分とに分割して考察すべきことを提案し、各々の効率を分離して求めている。

更に、電磁ポンプの効率を改善する方法について検討し、流体中のオーム損失を最小にする条件を示した。

以上の結果に基づいて、コンダクション形電磁ポンプの設計法について検討を加え、磁束密度を指定して効率を最大にするための駆動部断面形状を求めるなど、具体的に電磁ポンプを設計、製作する場合に役立つ事項を明らかにした。

次に、超電導電磁石を用いた場合を想定して磁極間隙の磁束密度を大きくした場合の電極ポンプ動作を検討し、高圧力・小流量のポンプ特性になること及び磁束密度を大きくすることにより、所望の出力密度で高効率の電磁ポンプを設計できることを示した。

又、コンダクション形電磁ポンプは低電圧大電流機器であるため、その内部インピーダンスが従来の電気機器に比べ非常に小さくなることに着目して、定電流源による電磁ポンプの起動現象について解析を行ない、実験的にも本装置の場合には、定電流起動であることを確かめた。

更に、直流コンダクション形電磁ポンプを直流電動機と対比して考察し、電磁ポンプが直流電動機に比べ効率が低くなる理由について検討した結果について述べた。

以上の考察の結果は、実際に小形の電磁ポンプを試作して、流体として水銀を用いて実験を行うことにより、ほぼ妥当であることを確認している。

## 第4章 交流コンダクション形電磁ポンプの動作解析

交流コンダクション形電磁ポンプの動作は、渦電流の存在のため、導電性流体への磁束の滲透が妨げられることなどの理由により、その動作は複雑となるが、筆者は、直流コンダクション形電磁ポンプの動作は、交流コンダクション形電磁ポンプの電源周波数を零とした場合の特別なものと考えた。この考えの下に、直流コンダクション形電磁ポンプの動作解析に用いた手法を拡張することにより、交流コンダクション形電磁ポンプの動作解析を行なった結果について述べている。

此処では、電機子反作用、渦電流及び電極間電圧分布などの影響を考慮して駆動部内の電流分布、磁束分布を示す式を導き、これらの分布に及ぼす、電源周波数、電極間電圧分布及び磁束と

電流の間の位相差などの影響を明らかにした。

次いで、ポンプ発生圧力、流体中のオーム損失、ポンプ出力並びに効率などの交流コンダクション形電磁ポンプの基本式を導いた。

(4.1) 式にポンプ発生圧力の式を示す。

$$P_z = \frac{\mu \bar{H}_a \bar{J}_a c}{2(F_1^2 + F_2^2)} \left( \frac{H_{ia}}{\bar{H}_a} \right) \left[ (K_2 - K_1) + (p c k_1 k_2 \frac{\bar{H}_a}{H_{ia}} K_3 - \frac{(V_0 - V_c)}{b v \mu H_{ia}} K_2) \cos \theta \right. \\ \left. + \left\{ \frac{(V_0 - V_c)}{b v \mu H_{ia}} (K_4 - K_3) - p c k_1 k_2 \frac{\bar{H}_a}{H_{ia}} K_2 \right\} \sin \theta \right] \quad (4.1)$$

但し、 $\bar{H}_a$  は平均磁界強度、 $\bar{J}_a$  は平均電流密度、 $H_{ia}$  は電極電流による磁界の最大値、 $\theta$  は磁束と電流の位相差、 $p = \mu b v / 2(\rho b + 2 r c)$ 、 $k_1 = \sqrt{1/4 + (\omega/pv)^2} + 1/2$ 、 $k_2 = \sqrt{1/4 + (\omega/pv)^2} - 1/2$  であり、 $\rho$  は流体の抵抗率、 $r c$  は流体と電極間の単位面積当りの接触抵抗、 $\omega$  は電源角周波数、 $\mu$  は透磁率、 $v$  は平均流速、 $b$  は駆動部の幅、 $c$  は駆動部の長さであり、 $K_1 \sim K_4$  及び  $F_1^2 + F_2^2$  は  $p k_1 c$ 、 $p k_2 c$  の双曲線関数、三角関数の積で表わされるものである。(本文参照)。

(4.1) 式は電源周波数  $f$ 、磁束と電流の間の位相差  $\theta$  の関数であり、発生圧力  $P_z$  は磁束と電流の位相差  $\theta$  のある値で最大値となり、発生圧力  $P_z$  が最大になる  $\theta$  の値は、電源周波数が小さくなるに従って零に近づいていくことが示される。

又、(4.1) 式はポンプに印加する電源の周波数を零にした場合、(3.1) 式で示される直流コンダクション形電磁ポンプの発生圧力の式と全く同一になることを示した。このことについては、磁界強度分布、電流密度分布及び流体中のオーム損失の式についても確かめている。即ち、交流コンダクション形電磁ポンプの基本式は、電源周波数が零の直流の場合を含むコンダクション形電磁ポンプの動作を示す一般式であることを指摘したものである。

これらの基本式の正しいことは、第3章の場合と同様に小形の電磁ポンプを試作して、流体として水銀を用いて実験を行うことにより、ほぼ妥当であることを確かめている。

更に、コンダクション形電磁ポンプの磁束或いは電流を増加していくと、ある圧力以上で流体が不連続になり、振動を繰り返す、それ以上入力を増加しても圧力が増加しなくなる異常現象を見出し、このような異常現象を防止する対策について検討した結果について述べた。

## 第5章 コンダクション形電磁ポンプの応用

本章ではコンダクション形電磁ポンプの応用について記述した。即ち、コンダクション形電磁ポンプと同じ動作原理に基づき、興味ある装置であるとして提案されている直流変圧装置につい

て、第3章で導いたコンダクション形電磁ポンプの解析手法を適用して、その動作を理論的及び実験的に検討した結果について述べている。

直流変圧装置は直流コンダクション形電磁ポンプと電磁流体発電機を流体回路で結合した形式のものであり、このような装置について、実際の動作に基づいた仮定の下に動作解析を行い、一次電圧、二次電圧及び効率などの基本式を導き、効率を上昇させるための方法について検討を加えた。又、実際に直流変圧装置を試作して、流体として水銀を用いた場合について実験を行い、理論との対比を行っている。

## 第6章 結 論

本章においては、本研究で得られた結論について述べている。

(1) まず、直流コンダクション形電磁ポンプについて、比較的簡単な条件の下にその動作特性を明らかにした。即ち、電磁ポンプ設計に必要なポンプ出力、効率などの理論式を、流体損失考慮の下に導くと共に、電機子反作用の意味とその防止の方法を明らかにし、ポンプ効率を大きくするための最適駆動部形状を理論的に求めた。更に、電磁ポンプ動作を電動機部とポンプ部に分離して考察すべきことを提案し、又、直流コンダクション形電磁ポンプを直流電動機と対比して考察を行った。これらの考察の結果は実験により、ほぼ妥当であることを確かめた。

(2) 次いで、交流コンダクション形電磁ポンプについても、同様に簡単な条件の下に動作解析を行い、その基本式を導くと共に、駆動部流体中の磁束分布及び電流分布と電源周波数、磁束と電流の間の位相差などとの相互関係を明らかにした。

更に、これらの基本式は電源周波数を零にした場合、直流コンダクション形電磁ポンプの基本式と全く同一であることを示した。このことは、直流コンダクション形電磁ポンプも理論上においては交流コンダクション電磁ポンプの中に含めて考えることができることを示したものである。

これらの考察の結果も実験により、ほぼ妥当であることを確かめた。

(3) 前2項で用いたコンダクション形電磁ポンプの解析手法を適用して、直流変圧装置の動作解析を行ない、一次電圧、二次電圧及び効率などの基本式を導き、更に、実験的にもその動作を検討し、直流変圧装置の動作特性を明らかにした。

(4) 更に、コンダクション形電磁ポンプの磁束或いは電流を増加していくと、ある圧力以上で、駆動される流体が不連続になり、振動を繰り返す、それ以上入力を増加しても圧力が増加しなくなる異常現象を実験的に見出し、このような異常現象を防止する対策について検討した。

以上、本研究で得られた結論を要約して記述した。

# 審 査 結 果 の 要 旨

電磁ポンプは構造簡単で可動部がなく、ポンプの挿入されている循環系統を気密に保つことが容易である為に、原子力発電に用いられる導電性流体の循環用ポンプとして、あるいは冶金および化学工業における金属流体の輸送用ポンプなどとして重要な用途が考えられている。しかし電磁ポンプは一般の電気機器と異なり、磁束および電流が複雑な立体分布をなす為に、電磁ポンプの正確な動作については、未だ十分な解明がなされていない。

著者は早くより電磁ポンプの有用性に着目し、最も構造の簡単なコンダクション形電磁ポンプについて、動作に関する基礎的研究を行ってきた。本論文はこれらの成果をまとめたもので全編6章よりなっている。

第1章は緒言である。

第2章では、コンダクション形電磁ポンプの動作機構を説明し、更に電機子反作用、導電性流体の流速分布に与える印加磁界の影響など、動作解析に必要な基礎的事項について考察した結果を述べている。

第3章では、直流コンダクション形電磁ポンプの動作解析について述べている。著者は電磁ポンプの動作を、電動機に対応する部分とポンプに対応する部分に分けて考察すべきことを提案し、この考えの下に、電磁ポンプの流量、圧力、効率などの基本式を流体損失を考慮に入れて導くと共に、最適な駆動部形状についても理論的に求めている。さらに水銀を流体とする電磁ポンプを試作し、実験と解析結果が良好な一致を示す事を確かめている。本章で得られた基本式および実験結果はコンダクション形電磁ポンプの設計、製作に役立つ有用な成果である。

第4章では、交流コンダクション形電磁ポンプの動作解析について述べている。すなわち、前章の解析手法を交流の場合に拡張し、渦電流、周波数、磁束と電流の位相差などを考慮に入れ、流量、圧力、効率などの基本式を導くと共に、実験結果との比較を行って動作解析の正しいことを確かめている。更に電源周波数を変えた場合の電磁ポンプ特性について論及し、直流と交流を含めてコンダクション形電磁ポンプの動作を統一的に解明していることは新しい知見である。なおコンダクション形電磁ポンプの実験において、電流を増加させポンプ圧力を増してゆくと、ある圧力以上で流体として用いた水銀が振動を繰り返す、それ以上入力を増しても圧力が増加しなくなる異常現象を見出しているが、これはコンダクション形電磁ポンプ出力の上限を規制する重要な発見である。

第5章では、コンダクション形電磁ポンプの応用として提案されている直流変圧装置について、第3章で用いた解析手法を適用し、その動作を理論的に解明すると共に、実際に変圧装置を試作

実験し、実用上の諸問題について論じた結果を述べている

第6章は結言である。

以上要するに本論文は、直流および交流のコンダクション形電磁ポンプの動作を統一的に解明し、実際に電磁ポンプを設計、製作する立場に役立つ有用な事項をあきらかにしたものであり、電気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。